

УДК 629.73-03-419(045)

ББК 059-089 051-56739.8  
Х. 6739.8

В.М. Синеглазов, Ю.Н. Безкоровайный

**ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ РЕВЕРБЕРАЦИОННОГО МЕТОДА  
НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ**

*Описана имитационная модель акустического реверберационного метода неразрушающего контроля, основанная на преобразовании имитируемого образца в дискретную модель и отслеживании траекторий акустических волн в ней.*

Анализ развития авиационной техники показывает, что перспективы ее совершенствования связаны с использованием композиционных материалов. Их эксплуатационные характеристики могут быть повышены за счет создания эффективных приборов неразрушающего контроля. Одним из подходов к решению поставленной задачи является создание имитационных моделей методов неразрушающего контроля с целью изучения их возможностей в реальных условиях и использования результатов исследований для совершенствования соответствующих приборов неразрушающего контроля.

Рассмотренный реверберационный метод ультразвукового неразрушающего контроля, называемый методом многократных отражений, является разновидностью эхо-метода [1]. Он основан на явлении реверберации упругих волн в слоях с относительно небольшим коэффициентом затухания ультразвуковых колебаний (УЗК) (обычно металлах). При контроле конструкций типа металл-пластик применяется два варианта метода.

В первом варианте импульсы УЗК вводятся в металлический слой, в котором наблюдаются многократно отраженные эхо-сигналы. Дефект соединения увеличивает коэффициенты отражения УЗК на границе раздела металл-пластик, в результате чего уменьшается скорость затухания амплитуд эхо-сигналов в слое металла.

Во втором варианте УЗК вводятся в слой пластика, в зоне доброкачественного склеивания УЗК переходят из пластика в металл и, многократно отражаясь в последнем, дают наблюдаемую на электронно-лучевой трубке серию затухающих импульсов. Дефект соединения (непроклей) препятствует прохождению УЗК в металлический слой, и реверберация в нем отсутствует.

Физическая модель изделия (рис. 1) представлена в виде  $r$  слоев с физическими свойствами, соответствующими свойствам реальных материалов (плотностью  $\rho$ , толщиной  $x$ , скоростью распространения продольных акустических волн  $c$  и коэффициентом затухания волн  $\delta$ ). При этом учитывается механическая часть акустического преобразователя. Внешние слои 1 и  $r$  обладают свойствами внешней среды. Дефект задается в виде слоя с соответствующими характеристиками.

Используя соотношения

$$K_{3s} = e^{-\delta x_s}, \quad t_s = \frac{x_s}{c_s}, \quad \varphi_s = \omega t_s, \quad (1)$$

где  $K_3$  – коэффициент затухания волны в слое толщиной  $x$ ;  $s$  – порядковый номер слоя;  $\delta$  – коэффициент

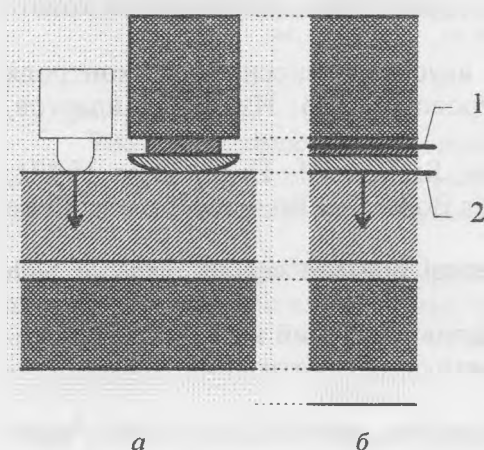


Рис. 1. Пример построения модели:  
а – реальный прототип; б – физическое представление модели;  
1 – регистрирующая граница;  
2 – излучающая граница

затухания;  $t$  – время прохождения волны в слое толщиной  $x$ ;  $c$  – скорость распространения волны в среде;  $\varphi$  – сдвиг фазы за время прохождения волны;  $\omega$  – круговая частота колебаний, физические свойства слоев приводят к характеристикам слоев коэффициентом затухания  $K_3$ , временем прохождения волны в слое  $t$  и сдвигом фазы  $\varphi$ .

Текущие характеристики волны описываются с помощью амплитуды колебаний  $A$ , времени прихода к границе  $t$ , фазы  $\varphi$ , вектора направления распространения  $W$  ( $W = \pm 1$ ) и номера текущей границы  $i$ .

При достижении границы раздела сред волна разделяется на отраженную и пропущенную, определяемые коэффициентами отражения/пропускания для случая прохождения волны из среды 1 в среду 2 (аналогично и для случая противоположного пути):

$$R_{1 \rightarrow 2} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}, \quad D_{1 \rightarrow 2} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1}, \quad (2)$$

где  $R$  – коэффициент отражения;  $Z$  – акустический импеданс:  $Z = \rho c$ ;  $D$  – коэффициент пропускания.

Если  $R < 0$ , то происходит изменение фазы.

Крайние границы модели задаются жестко для полного поглощения волны ( $R_0 = D_0 = R_r = D_r = 0$ ).

Сущность и механизм возникновения шероховатости поверхности образца описаны в работе [2]. В данной модели это явление реализуется с помощью многократных отражений в слое, эквивалентном слою шероховатости толщиной  $R_z$ , который задается между эквивалентными слоями сканирующей головки дефектоскопа и внешним контактном слоем, имеющим характеристики, способ определения которых отличается от способа определения характеристик обычного слоя вследствие неоднородности материала, находящегося в данном слое (воздух–твердое тело или жидкость–твердое тело).

Основным свойством слоя шероховатости является расщепление входящей волны на две волны, имеющие малый временной сдвиг относительно друг друга вследствие разных скоростей прохождения волн, что приводит к их взаимной интерференции. Взаимный временной сдвиг можно определить по формуле

$$\Delta t = \left| \frac{R_z}{c_c} - \frac{R_z}{c_{т.т}} \right| = R_z \left| \frac{c_{т.т} - c_c}{c_{т.т} c_c} \right| = \frac{R_z}{c_{т.т} c_c} |c_{т.т} - c_c|,$$

где  $R_z$  – толщина слоя шероховатости (рис. 2);  $c_{т.т}$  и  $c_c$  – скорости распространения волн в твердом теле и среде заполнения промежутков между выступами соответственно, которые рассчитываются по формулам (2).

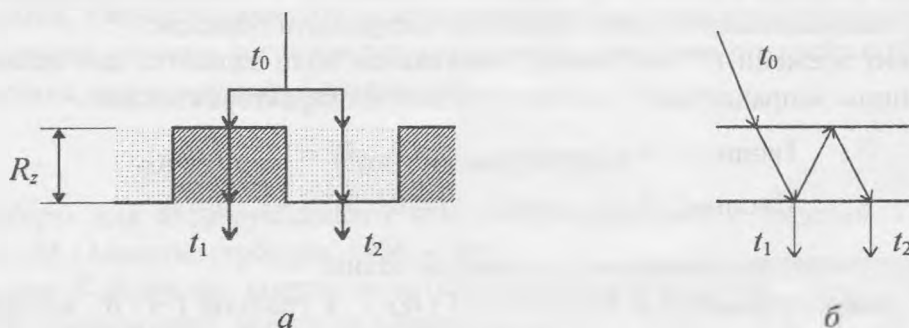


Рис. 2. Учет влияния шероховатости на границе между двумя слоями материалов:  
а – прохождение волн в реальном образце; б – схема замещения слоя шероховатости эквивалентным слоем материала

Поскольку сдвиг времени в эквивалентном слое моделируется с помощью двукратно отраженной волны, то временная задержка слоя  $t_s$  будет соответственно равна

$$t_s = \frac{\Delta t}{2}$$

Ввиду очень малой толщины данного слоя затухание акустической волны в нем можно не учитывать, т.е.  $K_3 = 1$ .

Сдвиг фазы  $\varphi_s$  рассчитывается по формуле (1).

Будем считать площадь выступов шероховатости внешнего слоя материала равной площади впадин, заполненных веществом внешней среды, тогда площадь переднего фронта волны, падающей на выступы шероховатости образца, будет равна площади падения фронта волны на ячейки со свойствами внешней среды. Пусть коэффициентом отражения от границы материала сканирующей головки с материалом внешнего слоя образца будет  $R_{см}$ , а с внешней средой –  $R_{сс}$ , тогда суммарный коэффициент отражения волны от границы раздела

$$R = \frac{1}{2}R_{см} + \frac{1}{2}R_{сс} = \frac{1}{2}(R_{см} + R_{сс}).$$

Аналогичным образом определяются и коэффициенты отражения: эквивалентный слой – сканирующая головка, эквивалентный слой – внешний слой образца, внешний слой образца – эквивалентный слой, а также коэффициенты пропускания для тех же комбинаций.

Зона контакта дефектоскопа с контролируемым изделием мала по сравнению с площадью, сканируемой дефектоскопом, и большая часть волн отражается от внешней границы образца, тем самым вызывая реверберацию. Чтобы в модели учесть данный факт воспользуемся формулой

$$R_i = R_{о-с}(1 - v) + R_{о-д}v,$$

где  $R_i$  – коэффициент отражения от внутренней границы внешнего слоя образца, контактирующего с дефектоскопом;  $R_{о-с}$  – коэффициент отражения от внутренней границы внешнего слоя образца при контакте с внешней средой;  $R_{о-д}$  – коэффициент отражения от внутренней границы внешнего слоя образца при контакте с материалом сканирующей головки дефектоскопа;  $v$  – отношение площади контактной зоны дефектоскопа к площади сканируемой поверхности ( $v = S_{конт}/S_{скан}$ ).

Влияние площади контакта следует учитывать только после учета всех факторов, влияющих на отражение волн от внутренней границы внешнего слоя образца (шероховатости поверхности).

Для модели задается точность  $\epsilon$ , граница излучения  $i_{и}$  и граница регистрации волн  $i_{р}$ .

Алгоритм имитационной модели выглядит следующим образом.

1. В момент времени  $t=0$  на границе испускания волн задаются две волны (или одна волна при заданном направлении) с соответствующими характеристиками:

$$\text{I волна} \quad A=1, \quad \varphi=\varphi_0, \quad t=0, \quad W=1, \quad i=i_{и};$$

$$\text{П волна} \quad A=1, \quad \varphi=\varphi_0, \quad t=0, \quad W=-1, \quad i=i_{и}.$$

Далее расчет ведется независимо для каждой волны.

2. Волна распространяется в среде  $s=i+(1+W)/2$  к границе  $t=i+W$ , которую она достигнет за время  $t_s$ , при этом амплитуда уменьшится в  $K_{3s}$  раз и фаза сдвинется на  $\varphi_s$ :

$$t=t_{-1}+t_s, \quad \varphi=\varphi_{-1}+\varphi_s, \quad A=A_{-1}K_{3s},$$

где индекс  $-1$  указывает на обозначение предыдущих характеристик волны.

3. При достижении границы раздела волна разлагается на прошедшую и отраженную, при этом ее характеристики соответственно изменяются:

$$\begin{aligned} \text{I волна} \quad A_{\Pi} &= AD_{i \rightarrow i+W}, \quad \varphi_{\Pi} = \varphi, \quad t_{\Pi} = t, \quad W_{\Pi} = W_{-1}, \quad i_{\Pi} = i_{-1} + W_{-1}; \\ \text{II волна} \quad A_{\text{O}} &= |AR_{i \rightarrow i+W}|, \quad \varphi_{\text{O}} = \varphi + \varphi_{\text{M}}, \quad t_{\text{O}} = t, \quad W_{\text{O}} = -W_{-1}, \quad i_{\text{O}} = i_{-1} + W_{-1}, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\varphi_{\text{M}}$  – изменение фазы колебаний при отражении от границы раздела сред.

4. Номер текущей границы сравнивается с номером регистрирующей границы  $i=i_{\text{P}}$ , если номера совпадают, то производится регистрация величин  $A_{\Pi}$ ,  $\varphi_{\Pi}$  и  $t_{\Pi}$  (3).

5. Сравнение амплитуд производится с точностью  $\varepsilon$ , если  $A < \varepsilon$ , то дальнейшее распространение волны не рассчитывается.

6. Пп. 2-5 повторяются для волн I и II соответственно до тех пор, пока количество рассчитываемых волн отличается от нуля.

7. С использованием амплитудно-временной функции посылаемого сигнала, а также зарегистрированных параметров волн воспроизводится амплитудно-фазовое воздействие на принимающий элемент исследуемого прибора:

$$\vec{F}(T) = \sum_{k=1}^l A_{\Pi k} F_s(T - t_{\Pi k}) e^{j\varphi_{\Pi k}} e^{j\omega(T - t_{\Pi k})}, \quad (4)$$

где  $l$  – количество зарегистрированных волн;  $F_s$  – функциональная зависимость амплитуды посылаемого сигнала от времени;  $\varphi$  – начальная фаза посылаемого сигнала;  $\omega$  – круговая частота посылаемого сигнала:  $\omega = 2\pi f$ .

Для моделирования помех также используется данный алгоритм, при этом воздействия накладываются так:

$$\vec{F}_{\text{P}}(T) = \vec{F}_{\text{C}}(T) + \vec{F}_{\text{ш}}(T),$$

где  $F_{\text{C}}$  – амплитудно-фазовая характеристика полезного сигнала;  $F_{\text{ш}}$  – амплитудно-фазовая характеристика фрикционных шумов.

Нахождение амплитудно-фазовых характеристик полезного сигнала и фрикционных шумов является отдельной областью исследования.

Таким образом, поскольку модель является детерминированной и процесс прохождения колебаний внутри образца не рассчитывается, алгоритм является простым для программной реализации вследствие использования простейших математических операций и требует мало машинных ресурсов, что ведет к сокращению времени расчетов.

Отсутствие в расчетах прохождения УЗК формы зондирующего сигнала позволяет проводить исследования влияния формы зондирующего сигнала на форму выходного сигнала дефектоскопа. Расчет параметров зарегистрированных волн для заданной модели приведет к сокращению времени расчетов для нахождения наиболее оптимальной формы зондирующего сигнала, что следует из формулы (4).

### Список литературы

1. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий Т. 2 / Под ред. В.В. Ключева. – М.: Машиностроение, 1986. – 296 с.
2. Гмырин Я. Влияние шероховатости поверхности ввода на структуру, форму и длительность ультразвукового импульса // Дефектоскопия. – 1995. – № 8. – С. 31-43.

Стаття надійшла до редакції 30 грудня 1999 року.